

# Определение параметров рассеяния асинхронных двигателей по экспериментальным данным на основе Т-образной схемы замещения

Бакубаев Б.Т., Лыткин В.В., Мойсейченков А.Н., Денисенко В.И.  
ФГАОУ ВПО "УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина", Екатеринбург, Российская Федерация.  
E-mail: kem\_em@urfu.ru

В статье рассматривается методика определения индуктивных сопротивлений рассеяния обмоток статора и ротора и ЭДС по экспериментальным данным опыта холостого хода и номинальной нагрузки асинхронных двигателей на основе Т-образной схемы замещения.

Асинхронный двигатель, схема замещения, параметры, индуктивные сопротивления рассеяния, экспериментальное определение, алгоритм обработки данных.

Практика электромагнитных расчетов показывает, что погрешности методик расчета при проектировании асинхронных двигателей вызваны неточным расчетом ЭДС, неточным определением индуктивностей ротора, неточной аппроксимацией кривой намагничивания применяемой стали, погрешностями в определении потерь в стали и др. Удельные потери в стали в отдельных типах машин существенно зависят от технологии изготовления магнитопровода.

Определение значения ЭДС с использованием измерительной обмотки, закладываемой в пазы статора на практике затруднительно. Особый интерес у расчетчиков вызывает возможность экспериментального определения индуктивностей обмоток статора и ротора, а также значения ЭДС машины при нагрузке. Эти обстоятельства вызывают необходимость экспериментальной проверки расчетных значений параметров Т-образной схемы замещения.

В [1] предложена простая методика определения параметров Т-образной схемы замещения по результатам испытаний машины в режиме холостого хода и в режиме номинальной или частичной нагрузки.

Ниже приводится усовершенствованная методика экспериментального определения параметров Т-образной схемы замещения и ЭДС при нагрузке асинхронной машины.

Предлагается при определении параметров вместо опыта холостого хода асинхронной машины, как предложено в [1], проводить опыт идеального холостого хода асинхронной машины, который необходим для компенсации механических потерь за счет приводной машины и исключения потерь в стали сердечника ротора. В этом случае нет необходимости использования метода разделения потерь для определения механических потерь асинхронного двигателя, применение которого приведет к росту погрешностей экспериментального нахождения параметров схемы замещения и к меньшей точности

нахождения магнитной характеристики.

Метод основывается на совместном решении системы уравнений асинхронного двигателя в режимах холостого хода и нагрузки с использованием характеристики намагничивания магнитной цепи. Намагничивающая цепь в схеме замещения представлена двумя параллельными ветвями (рис. 1).

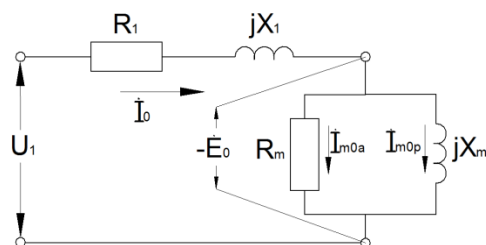


Рисунок 1 – Схема замещения асинхронной машины в режиме идеального холостого хода.

Система уравнений записывается относительно проекций векторных величин на вещественную и мнимую оси и сводится к решению системы алгебраических уравнений. Система составлена для случая, когда вектор напряжения сети  $\vec{U}_1 = U_1$  совпадает с вещественной осью. При решении предполагается, что в указанных режимах определены значения напряжения, тока, потребляемой из сети активной мощности, снята характеристика холостого хода и определено активное сопротивление обмотки статора. Для расчета приведенного активного сопротивления обмотки ротора необходимо измерить скольжение при нагрузке.

Векторная диаграмма для режима идеального холостого хода приведена на рисунке 1, где

$$\vec{I}_0 = \vec{I}_{0a} - j\vec{I}_{0p}. \quad (1)$$

В режиме идеального холостого хода присутствуют только потери на активном сопротивлении обмотки статора  $R_1$  и магнитные потери  $\Delta p_{\text{ст}}$  в сердечнике статора. Из данного опыта определяются токи  $I_{0a} = I_0 \cdot \cos \varphi_0$  и  $I_{0p} = I_0 \cdot \sin \varphi_0$  при  $U_1 = U_{1\text{н}}$ ; потери в стали определяются в результате выделения электрических потерь:  $\Delta p_{\text{ст0}} = P_0 - \Delta p_{\text{эл}}$ , где  $P_0$  - активная мощность, потребляемая в режиме идеального холостого хода;  $\Delta p_{\text{эл}} = 3I_0^2 R_1$ .

Система уравнений:

$$U_1 - I_{0a} \cdot R_1 - I_{0p} \cdot X_1 = E_{0a}$$

$$\begin{aligned} I_{0p} \cdot R_1 - I_{0a} \cdot X_1 &= E_{0p} \\ \sqrt{E_{0a}^2 + E_{0p}^2} &= E_0 \\ \frac{mE_0^2}{\Delta p_{\pi 0}} &= R_m \\ \frac{E_{0a}}{R_m} + \frac{E_{0p}}{X_m} &= I_{0a} \end{aligned} \quad (2)$$

Для определения индуктивных сопротивлений рассеяния использован метод последовательных приближений. Задав в первом приближении значение индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора  $X_1$ , в результате решения системы уравнений (2), описывающей процессы в асинхронной машине в режиме идеального холостого хода определяем значения сопротивлений схемы замещения:  $R_m$  - учитывает магнитные потери в сердечнике статора;  $X_m$  - индуктивное сопротивление взаимной индукции.

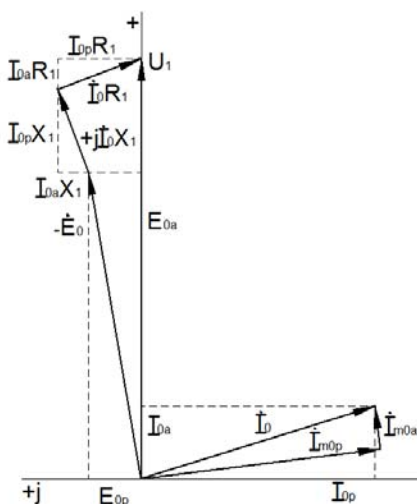


Рисунок 2 – Векторная диаграмма асинхронной машины в режиме идеального холостого хода.

На основе решения системы уравнений (2) определяются значения проекций ЭДС холостого хода на вещественную и мнимую оси  $E_{\text{вв}}$ ,  $E_{\text{вф}}$  и полное значение ЭДС намагничивающей ветви  $E_{\text{н}}$ .

В случае нагруженной асинхронной машины токи также раскладываются на активную и реактивную составляющие (рис.3):

$$\underline{I}_1 = I_{1a} - jI_{1b} \quad (3)$$

Система уравнений в режиме нагрузки, имеет следующий вид (рис.4):

$$\begin{aligned} I_{1a} \cdot R_1 + I_{1p} \cdot X_1 + I_{2a} \cdot R_{2s} + I_{2p} \cdot X_2 &= U_1 \\ -I_{1p} \cdot R_1 + I_{1a} \cdot X_1 - I_{2a} \cdot X_2 + I_{2p} \cdot R_{2s} &= 0 \\ U_1 - I_{1a} \cdot R_1 - I_{1p} \cdot X_1 &= E_{ma} \\ I_{1p} \cdot R_1 - I_{1a} \cdot X_1 &= E_{mp} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{E_{mp}}{X_m} = I_{mpa}$$

$$\frac{E_{mp}}{R_m} = I_{mpp}$$

$$I_{1a} - I_{2a} - I_{maa} + I_{mva} = 0$$

$$I_{10} - I_{20} - I_{\text{приб}} - I_{\text{рас}} = 0$$

Токи  $I_{1a} = I_1 \cdot \cos \varphi_1$  и  $I_{1p} = I_1 \cdot \sin \varphi_1$ 

определяются из опыта при заданном значении нагрузки и напряжении сети  $\dot{U}_1 = U_1$ ; значение  $R_{\Sigma} = R_{\Sigma}'/j_s$  находится из энергетической диаграммы:

$$\frac{R_z}{s} = \frac{P_z - 3I_z R_z - \Delta p_{cz}}{3(I_z)^2}, \quad (5)$$

где приведенное значение тока ротора определяется следующим образом:

$$(I_2')^2 = (I_{1a} - I_{mna} + I_{mna})^2 + (I_{1b} - I_{mnb} - I_{mnb})^2. \quad (6)$$

В выражении (6):  $I_{ma}$  и  $I_{mr}$  – активная и реактивная составляющие тока намагничивания,  $I_{max}$  и

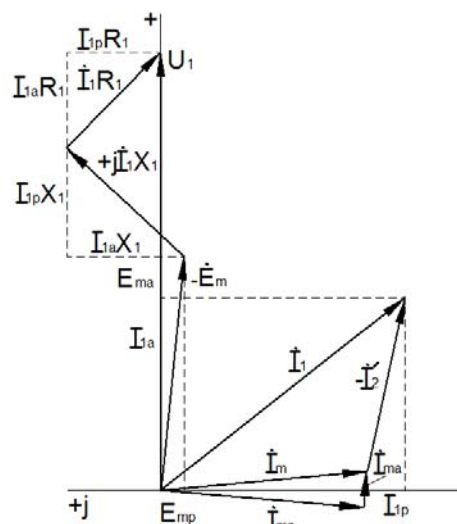


Рисунок 3 – Векторная диаграмма нагруженной асинхронной машины.

$I_{mp}$  - учитывают изменение фазы ЭДС намагничивающей ветви  $E_m$  при нагрузке.

Следует отметить, что в первом приближении при  $X_i = 1$  значения токов необходимо принять равными:  $I_{ma} = I_{oa}$ ;  $I_{mp} = I_{op}$ ;  $I_{maa} = 0$ ;  $I_{mrr} = 0$ ;  $\Delta p_{rr} = \Delta p_{ro}$ .

Определив  $R_m$  и  $X_m$  из (2) при заданном значении  $X_1$ , определяются следующие параметры: новое значение  $X_1$ ;  $X_2'$  - приведенное к числу витков обмотки статора индуктивное сопротивление рассеяния обмотки короткозамкнутого ротора;  $I_{2a}'$  и  $I_{2p}'$  - активная и реактивная составляющие приведенного тока ротора;  $I_{ma}$  и  $I_{mp}$ ; значения активной составляющей  $E_{ma}$ , реактивной составляющей  $E_{mp}$  и полное значение ЭДС намагничивающей ветви  $E_m$  путем совместного решения системы уравнений, описывающей процессы в асинхронной машине в режиме нагрузки.

Также определяются:

$$I_2' = \sqrt{I_{2a}'^2 + I_{2p}'^2}; \quad (7)$$

$$I_m = \sqrt{I_{ma}^2 + I_{mp}^2}. \quad (8)$$

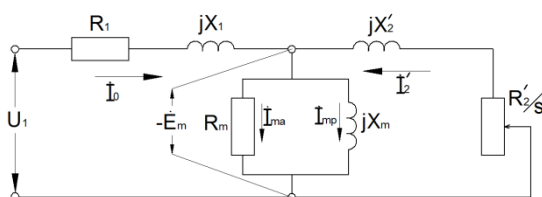


Рисунок 4 – Схема замещения нагруженной асинхронной машины.

После определения нового значения  $X_1$  по (2) расчет повторяется, причем после определения  $E_m$  уточняется значение потерь в стали нагруженной асинхронной машины:

$$\Delta p_{ст} = m E_m^2 / R_m. \quad (9)$$

Уточненное значение  $\Delta p_{ст}$ , вычисленные значения токов  $I_{ma}$ ,  $I_{mp}$  и  $I_m$  подставляются в (4).

Так как зависимость  $E_m = f(I_{mp})$  нелинейная, то необходимо уточнить значение тока  $I_{mp}$  по намагничивающей характеристике. При поиске значения  $X_1$  расчет повторяется определенное количество раз и для каждого значения  $X_1$  необходимо строить намагничивающую характеристику:

$$E_m(I_{mp}) = U_0(I_0) - R_1 I_0 - X_1 I_{mp}. \quad (10)$$

Затем уточненное значение  $I_{mp}$  по (10) подставляется в (6).

Расчет повторяется по (2)-(10) до тех пор, пока значения  $X_1$  на последующем и предыдущем шагах итерации превышают заданную погрешность.

В учебной лаборатории кафедры "Электрические машины" были проведены экспериментальные исследования асинхронного двигателя типа АО2-32-6, имеющего следующие номинальные данные:  $P_n = 2,2 \text{ кВт}$ ;  $n_n = 950 \text{ об/мин}$ ;  $U_1 = 220/380 \text{ В}$ ;  $I_1 = 9,3/5,4 \text{ А}$ ;  $\eta = 81\%$ ;  $\cos \varphi = 0,77$ .

Программа испытаний включала следующие опыты:

- опыт идеального холостого хода асинхронного двигателя при вращении его синхронным двигателем соизмеримой мощности с таким же числом пар полюсов;

- опыты снятия рабочих характеристик при поддержании напряжения питания асинхронного двигателя, равным номинальному значению 220 В.

Нагрузка асинхронного двигателя осуществлялась машиной постоянного тока в режиме генератора. В качестве нагрузки генератора использовался реостат.

При проведении экспериментов для регулирования напряжения, питающего асинхронный двигатель, использовался индукционный регулятор.

Выполнялись измерения и регистрация измеренных значений трех фазных напряжений, трех

фазных токов обмотки статора, частоты вращения ротора.

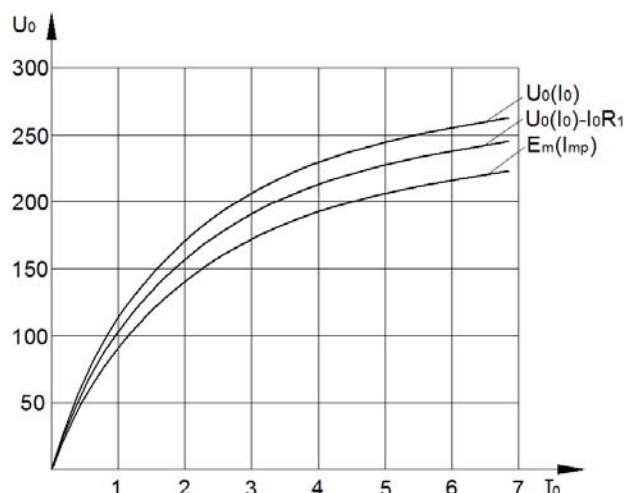


Рисунок 5 – Характеристики идеального холостого хода и намагничивания магнитной системы асинхронного двигателя.

Для измерений и регистрации измеренных значений использовались датчики тока типа LA 55-P/SP1 датчики напряжения типа LV 25-800, лазерный фотоотметчик оборотов типа КР-020Л с одной светоотражающей меткой на валу ротора асинхронного двигателя, 7 измерительных каналов многоканального измерительного комплекса National Instruments с частотой взятия выборки 10 кГц на каждый канал.

Непосредственно перед проведением каждого опыта и после его окончания выполнялись измерения активного сопротивления фаз обмотки статора асинхронного двигателя. Максимальное изменение активного сопротивления фаз обмотки статора за время проведения опыта не превышало 1%.

Методика расчета параметров рассеяния асинхронных двигателей по экспериментальным данным на основе Т-образной схемы замещения была реализована в среде MathCad.

Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Опытные значения параметров Т-образной схемы замещения.

$R_1$ , о.е.	$X_1$ , о.е.	$X_2'$ , о.е.	$R_2'$ , о.е.	$R_m$ , о.е.	$X_m$ , о.е.
0,063	0,081	0,067	0,06	22,83	1,365

Величина потерь в стали уменьшилась в номинальном режиме по сравнению с холостым ходом на 10 %.

Разработанный метод позволяет по экспериментальным данным выполнить разделение параметров рассеяния обмотки статора и обмотки ротора, определить кривую намагничивания магнитной цепи асинхронного двигателя и определить изменение потерь в стали при нагрузке машины.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Макаров Л.Н. Разработка и освоение производства высокоэффективной конкурентно способной серии асинхронных машин: автореферат дис. докт. техн. наук: 05.09.01 / Л.Н.Макаров. - М. 2006.-40 с.